第47卷　第1期
2024年1月
干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY
Vol. 47 No. 1
Jan. 2024

人类活动及气候变化影响下伊犁河谷生境质量预测研究

隋　露[1]，　闫志明[2]，　李开放[3]，　何佩恩[1]，　马英杰[1]，　张汝苹[1]

（1. 新疆农业大学公共管理学院（法学院），新疆 乌鲁木齐　830052；2. 新疆农业大学MPA教育中心，新疆 乌鲁木齐　830052；3. 南京大学地理与海洋科学学院，江苏 南京　210023）

摘　要：生境质量是衡量生态系统服务功能及其健康程度的重要指标，准确预测生境质量的演变对于推动区域生态环境的高质量发展至关重要。耦合系统动力学–斑块生成土地利用模拟（SD-PLUS）模型与生态系统服务和权衡的综合评估（InVEST）模型，预测了2035年不同气候情景下（SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0、SSP5-8.5）伊犁河谷土地利用/覆被格局变化，并评估了其生境质量时空演变特征。结果表明：（1）1980—2020年，伊犁河谷土地利用类型呈现“4增2减”的变化趋势。2035年4种气候情景下，伊犁河谷林草地面积降幅较大，建设用地扩张趋势较为明显，挤占了城郊优质耕地资源。（2）伊犁河谷生境质量等级与土地利用/覆被类型密切相关。生境高值及较高值区主要分布在地形崎岖的林草地覆被区，低值及较低值区主要分布在人类活动集聚区及南北天山未利用地覆被区。（3）1980—2020年，伊犁河谷生境质量呈现下降趋势。生境质量退化区主要分布在伊犁河–巩乃斯河流域以及特克斯河流域附近。（4）2035年4种气候情景下，伊犁河谷生境指数持续走低。生境指数均值排序为：SSP1-2.6>SSP2-4.5>SSP3-7.0>SSP5-8.5。伊宁市、边境口岸、农牧业基地等区域生境质量存在退化风险。研究结果可为伊犁河谷地区生态修复政策的制定提供参考依据，为干旱区半干旱区生境质量预测提供新思路。

关 键 词：生境质量；气候变化情景；SD-PLUS模型；InVEST模型；伊犁河谷
文章编号：1000－6060(2024)01－0104－13(0104～0116)

生境质量是指自然界提供给物种适宜生存条件的能力，它可以体现区域生态系统服务价值的高低，是人类与自然和谐共生的先决条件[1]。随着新型工业化和城市化建设的深入推进，我国国土空间的开发利用格局发生了剧烈的变化，导致部分地区出现生境破碎化、生态系统服务价值降低及生物多样性衰减等现象，进而对人类福祉构成了威胁[2-3]。干旱半干旱区作为我国生态系统的重要组成部分，其恶劣的自然地理条件，导致其生境一旦退化将难以修复，这使得我国在生态文明建设过程中对该地域的生态演变状况需倍加关注[4]。

有研究表明气候变化和人类活动是引起生境质量演变的主要驱动因素，二者共同作用于土地利用/覆被格局[5]。目前关于生境质量的研究大多围绕土地利用类型变更展开，随着土地利用预测模型的出现和逐渐成熟，不少学者开展了未来发展情景下土地利用变化对生境质量影响的研究，为认识土地利用/覆被变化对生境质量的影响奠定了良好的基础[6-9]。然而，关于生境质量的研究仍存在一些不足。首先，情景设置过程中忽略气候因素对土地利用/覆被及生境质量的影响。政府间气候变化专门委员会（IPCC）研究报告表明人类活动已经引发全球气候变暖，预计到21世纪中期这一现象仍将持续，这无疑提升了干旱半干旱区生态保护工作的挑战[10]。其次，研究发现以往预测中，多情景设置普遍存在土地利用数量需求转移设置较为随意、主观性极强的现象，这将造成生境质量预测结果的不确定性，影响研究成果的实用性[11]。系统动力学（SD）

收稿日期：2023-06-11；　**修订日期：**2023-07-06
基金项目：2023年自治区高校基本科研业务费科研项目（XJEDU2023J019）资助
作者简介：隋露（1997-），女，硕士研究生，主要从事土地利用与生态管理. E-mail: suilu1220@163.com
通讯作者：闫志明（1987-），男，副教授，主要从事农村资源与环境管理. E-mail: yanzhiming88@163.com

模型可以反映多个复杂系统结构的非线性动态变化及各组件功能之间的相互作用关系，是用于预测未来各种情况下，系统动态行为而建立的结构模型[12-13]。将自上而下预测土地数量需求的SD模型与自下而上模拟土地空间分布的PLUS模型相结合，可以更精准地预测研究区未来土地变化趋势[14]。

伊犁河谷作为新疆对外开放的西大门，在“一带一路”建设中拥有着巨大的优势与潜力，因具有丰富的水土、光热以及矿产资源，使其成为国家重要的农牧业与能源基地[15]。20世纪80年代以来，农牧业的发展、矿产资源的挖掘、旅游业的兴起等开发建设活动加剧了对伊犁河谷生态环境的干扰。如何处理生态安全与经济发展之间的矛盾，已经成为该地区规划建设亟待解决的问题[16]。基于此，本文通过耦合SD-PLUS与InVEST模型，预测2035年4种典型气候情景下（SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0、SSP5-8.5）土地利用/覆被及生境质量时空演变，为伊犁河谷国土资源优化配置及生态环境保护修复提供参考依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

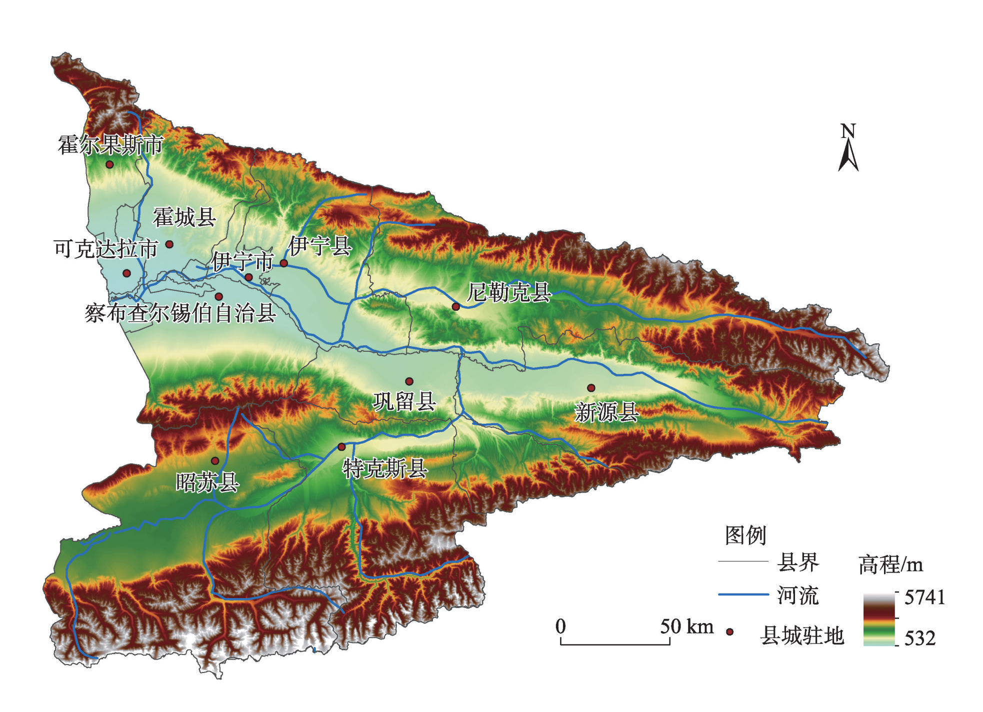
伊犁河谷（80°09′~84°56′E，42°14′~44°50′N）位于中国新疆西北部，隶属于伊犁哈萨克自治州。该流域北、东、南三面环山，海拔介于532~5741 m，地势东高西低、东窄西宽，形似朝西开口的喇叭状[17]（图1）。伊犁河谷为温带大陆性气候，独特的地形地貌特征，使其常年受到大西洋水汽的滋养，气候温和湿润。该地区年均气温为10.4 ℃，年均降水量为417.6 mm，高海拔区降水量可达1000 mm，拥有着“独立湿岛”的美誉[18]。

1.2 数据来源

本文使用的1980—2020年土地利用、人口密度、GDP、年均气温、年均降水量、河流、道路数据来源于中科院资源环境数据中心（http://www.resdc.cn/）；高程数据来源于地理空间数据云平台（http://www.gscloud.cn/）；社会经济数据来源于《新疆统计年鉴》《伊犁哈萨克自治州统计年鉴》；未来人口、地区生产总值、城镇化率数据来源于共享社会经济路径（SSPs）人口和经济格点化数据集及中国省级城镇化率预测数据集中的共享研究成果[19-20]；未来气温和降水数据来源于CMIP6气候数据集（https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/）中北京气象中心发布的BCC-CSM2-MR模式。

1.3 研究方法

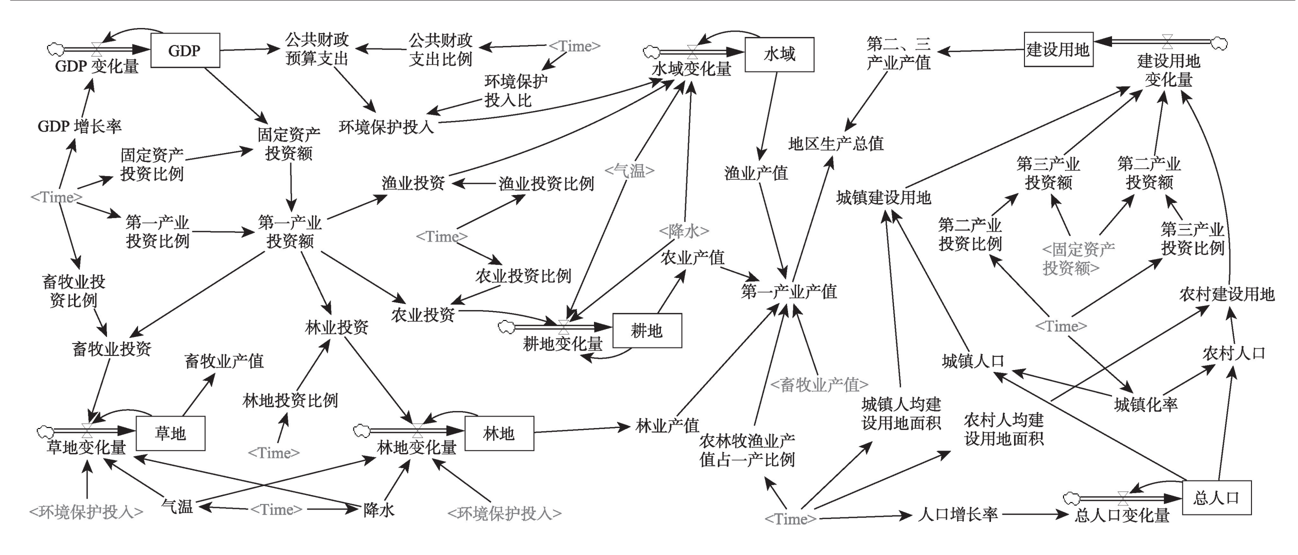
1.3.1 系统动力学（SD）模型 SD模型将研究区域视为一个相对独立的地域系统，在Vensim软件的帮助下实现系统的仿真模拟。在借鉴前人经验[21-22]的基础上，构建适合伊犁河谷的仿真模型。如图2所



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务器网站下载的审图号为GS(2021)142号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area



注：GDP为地区生产总值；Time为时间参数。

图2　系统动力学(SD)模型结构

Fig. 2　SD model structure

示，本研究设计的仿真模型由经济、人口、气候及土地利用子系统4部分构成。该模型根据系统内部存在的信息反馈机制，建立各子系统之间的因果关系，通过反复调试辅助变量和水平变量间的作用关系，确定系统流图及数学方程式。模拟构成分为2步，第一步为利用收集到的2010—2020年历史数据进行模型检验；第二步为在精度达到要求的基础上，预测2020—2035年多情景下土地利用数量需求。

1.3.2　斑块生成土地利用模拟(PLUS)模型　PLUS模型是由网格斑块生成的土地利用变化模拟模型，它可以更好地探究各地类变化的诱因，模拟几米范围内土地利用斑块层面的变化。该模型包括土地扩张分析策略(LEAS)和基于多类随机斑块种子的元胞自动机(CARS)2个模块[23-24]，LEAS模块可以对2期土地利用变化之间的扩张部分进行提取和分析，并结合随机森林算法则挖掘各地类的发展概率和各驱动因素贡献率；CARS模块结合随机种子生成和阈值递减机制，模拟发展概率约束下的斑块自动生成。在PLUS模型中，使用LEAS模块分析2015—2020年的土地扩张情况；然后根据2015—2020年各地类的转移规律设置领域权重。

1.3.3　气候情景设置　气候情景是一种特殊的设定，它基于一系列科学假设，合理地描述了未来气候状况的时空分布。第六次国际耦合模式比较计划将共享社会经济路径(SSPs)与最新的人为排放趋势(RCPs)结合，预测了未来气候变化趋势，为预测未来气候变化情景下生境质量的演变提供了可能性[25-26](表1)。

1.3.4　生境质量评估　本研究应用InVEST模型中的Habitat quality模块生成栖息地质量图，反映伊犁河谷生境质量状况[27]，计算公式如下：

$$Q_{xj} = H_j \times \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z}\right)\right] \tag{1}$$

式中：Q_{xj}为地类j在空间单元x处的生境指数；H_j为地类j的生境适宜性；z为模型默认值；k为半饱和参数；D_{xj}为地类j在空间单元x处的生境胁迫水平，计算公式如下：

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^{R}\sum_{y=1}^{Y_r}\left(\frac{w_r}{\sum_{r=1}^{R} w_r}\right) \times r_y \times i_{rxy} \times \beta_x \times S_{jr} \tag{2}$$

式中：R为威胁因子；Y_r为威胁因子r的数量；w_r为

表1　气候情景描述

Tab. 1　Description of climate scenarios

情景	辐射强迫类型	发展路径	2100年辐射强迫/W·m^{-2}	情景描述
SSP1-2.6	低	可持续发展	2.6	低脆弱性、减缓压力和低辐射强迫
SSP2-4.5	中	中度发展	4.5	中等社会脆弱性和中等辐射强迫
SSP3-7.0	高	局部发展	7.0	相对较高的社会脆弱性与人为辐射强迫
SSP5-8.5	高	常规发展	8.5	传统化石燃料为主的高排放和高辐射

威胁因子 r 的权重；r_y 为空间单元 y 中威胁因子 r 的数量；i_{rxy} 为空间单元 y 中威胁因子 r 对空间单元 x 的影响；β_x 为空间单元 x 受保护程度；S_{jr} 为地类 j 对威胁因子 r 的敏感程度。

本研究选取受人类活动干扰较大的耕地、建设用地、未利用地、铁路及高速公路作为威胁因子，并结合前人经验[28-29]设定威胁因子及各地类生境适宜性等参数，具体见表2、表3。

2 结果与分析

2.1 SD-PLUS集成模型精度检验

SD模型模拟结果显示，2020年各类变量的模拟值与实际值之间的相对误差控制在±3%以内（表4），这表明该模型具有较高的模拟精度，可以有效地预测研究区土地利用结构变化。将模拟得出的各类土地需求栅格数输入PLUS模型中，得到2020年伊犁河谷土地利用空间分布模拟结果（图3）。PLUS模拟结果总准确率为0.97，Kappa系数为0.94，FOM值为0.10，模拟结果的分布特征与河谷范围内的实际分布高度吻合，所选的3个局部地区在土地利用类型的空间分布上也表现出高度的一致性。以上结果表明，SD-PLUS集成模型所构建的系统流图、数学方程式、各类用地的发展概率及驱动因素符合伊犁河谷地区的实际情况，可以有效地呈现研究区域土地利用动态，适用于伊犁河谷地区未来土地利用/覆被变化的建模。

表2　威胁因子影响距离及权重

Tab. 2　Impact distance and weight of threat factors

威胁因子	影响距离/km	权重	衰退类型
耕地	2	0.2	线性
建设用地	8	1.0	指数
未利用地	3	0.4	线性
铁路	6	0.6	线性
高速公路	5	0.5	线性

2.2 伊犁河谷土地利用/覆被演变

伊犁河谷土地利用/覆被类型以草地、耕地、林地为主，三者面积约占研究区总面积的85%左右。1980—2020年，伊犁河谷各地类面积呈现“4增2减”的变化趋势。其中，耕地、建设用地、未利用地、水域面积分别提升了2793.30 km^2、383.75 km^2、295.14 km^2、83.70 km^2；草地、林地面积分别降低了3324.82 km^2、231.07 km^2。40 a间，伊犁河谷土地转移面积为6002.29 km^2，其中草地转出面积最大，占转出比例的71.42%，草地分别向耕地、未利用地、建设用地、水域面积转移了3516.12 km^2、255.03 km^2、202.37 km^2、153.43 km^2，这说明草地为该4类用地面积增加的主

表3　生境适宜性及敏感度

Tab. 3　Habitat suitability and sensitivity

地类	生境适宜性	敏感度				
		耕地	建设用地	未利用地	铁路	高速公路
耕地	0.4	0.2	0.9	0.4	0.5	0.5
林地	1.0	0.5	0.8	0.2	0.9	0.8
草地	0.9	0.2	0.5	0.3	0.7	0.7
水域	1.0	0.4	0.6	0.5	0.8	0.7
建设用地	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
未利用地	0.1	0.1	0.3	0.2	0.2	0.1

表4　SD模型模拟精度检验

Tab. 4　SD model simulation accuracy check

变量	年份	实际数据	模拟结果	相对误差/%
总人口/10^{4}人	2020	284.84	284.96	0.04
GDP/10^{8}元	2020	1266.01	1263.77	−0.18
耕地/km^2	2020	9080.26	9039.17	−0.45
林地/km^2	2020	3594.13	3609.76	0.43
草地/km^2	2020	34156.11	34163.80	0.02
水域/km^2	2020	1359.88	1359.89	0.00
建设用地/km^2	2020	920.30	900.27	−2.18

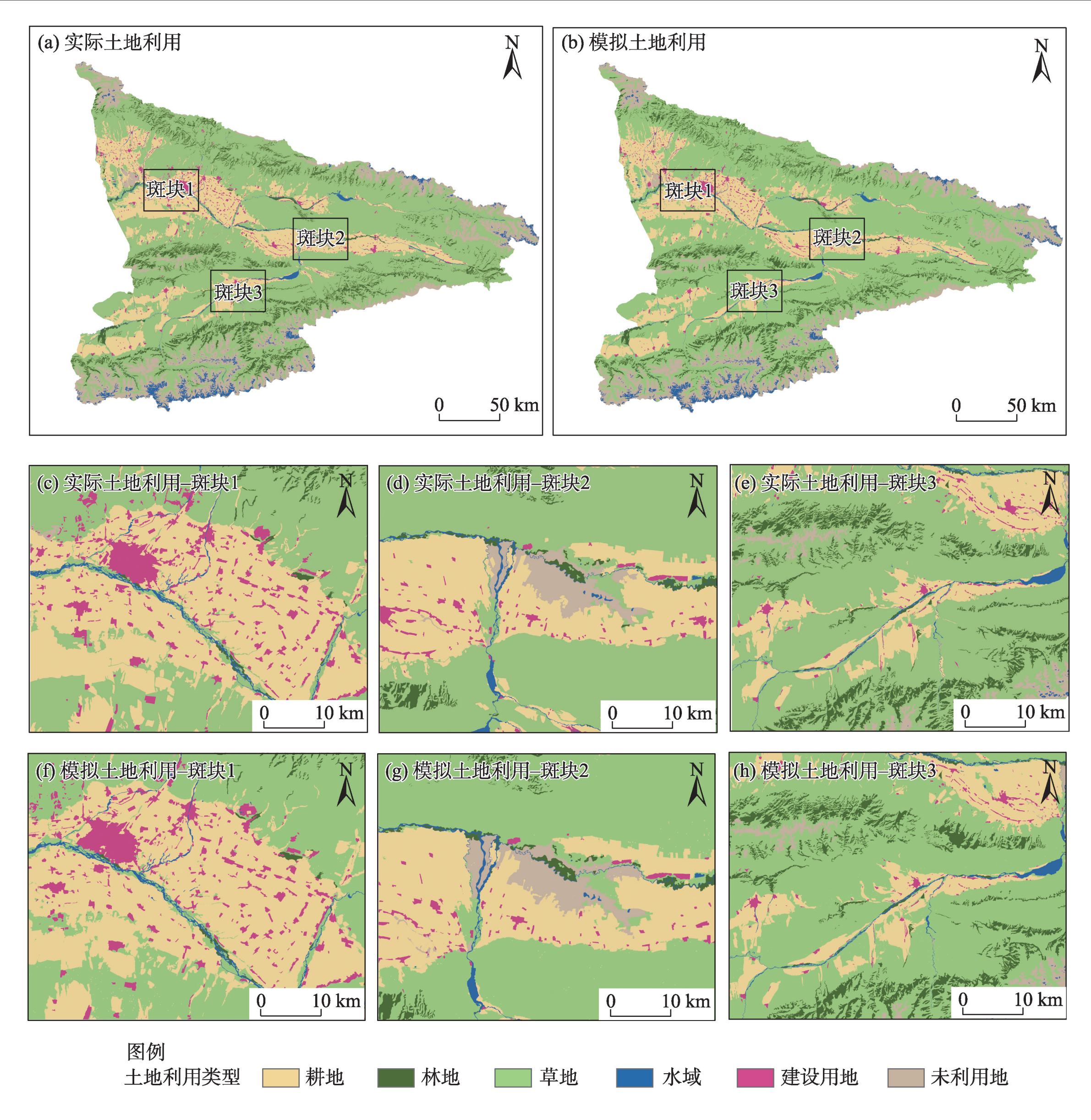


图3 2020年实际与模拟土地利用类型分布

Fig. 3 Distributions of actual and simulated land use types in 2020

要贡献主体(表5)。此外,值得注意的是,受"三山夹两谷"独特地形地貌特征的影响,导致该地区适宜人类开发建设的面积有限,40 a间建设用地在扩张的过程中蚕食了高达295.04 km^{2}的城郊优质农田。

SD-PLUS集成模型预测结果显示,未来15 a间耕地、林地、草地面积主要呈现下降趋势,水域、建设用地、未利用地面积主要呈现上升趋势(图4)。SSP1-2.6情景下,林地、草地、水域此类生态用地面积占比大于其他3种情景,该情景下未利用地得到有效开发,建设用地面积增长最为缓慢。SSP5-8.5情景下,生态用地面积下降幅度最大,建设用地面积骤增,大肆采矿、无节制的燃烧化石燃料等人类盲目扩张活动,导致南北天山永久冰川消融、雪线提升,水域、未利用地面积大幅增加。与上述2种情景相比,SSP2-4.5情景与当前发展模式类似,SSP3-7.0情景注重局部地区优先发展,这2种情景下各类用地面积变化介于SSP1-2.6情景与SSP5-8.5情景2种极端气候情景之间,波动相对较小。

2.3 伊犁河谷生境质量评估

将SD模型预测的各种发展情景下土地利用数量需求输入PLUS模型中,以可视化呈现伊犁河谷2035年多情景下土地利用演变。在InVEST模型中输入处理好的土地利用及威胁源图层、威胁源及生境适宜性表格、半饱和参数等数据,以评估伊犁河谷生境质量演变状况。生境指数值域介于[0, 1]之间,指数越大代表其生境质量越好。根据研究区实

表5　1980—2020年各地类面积转移矩阵

Tab. 5　Area transfer matrix by land type from 1980 to 2020

年份	土地类型	1980年							转出面积/km²	转出比例%
		耕地/km²	林地/km²	草地/km²	水域/km²	建设用地/km²	未利用地/km²	各地类面积/km²		
2020年	耕地	5371.26	16.01	534.11	67.97	295.04	2.56	6286.95	915.69	15.26
	林地	73.95	3408.18	286.50	33.08	3.69	19.80	3825.20	417.02	6.95
	草地	3516.12	160.17	33193.81	153.43	202.37	255.03	37480.93	4287.12	71.42
	水域	6.22	5.29	71.69	1093.54	0.54	98.90	1276.18	182.64	3.04
	建设用地	84.86	0.46	30.47	2.84	417.91	0.02	536.56	118.65	1.98
	未利用地	27.84	4.02	39.53	9.02	0.76	5829.17	5910.34	81.17	1.35
	各地类面积	9080.25	3594.13	34156.11	1359.88	920.31	6205.48	55316.16	6002.29	100.00

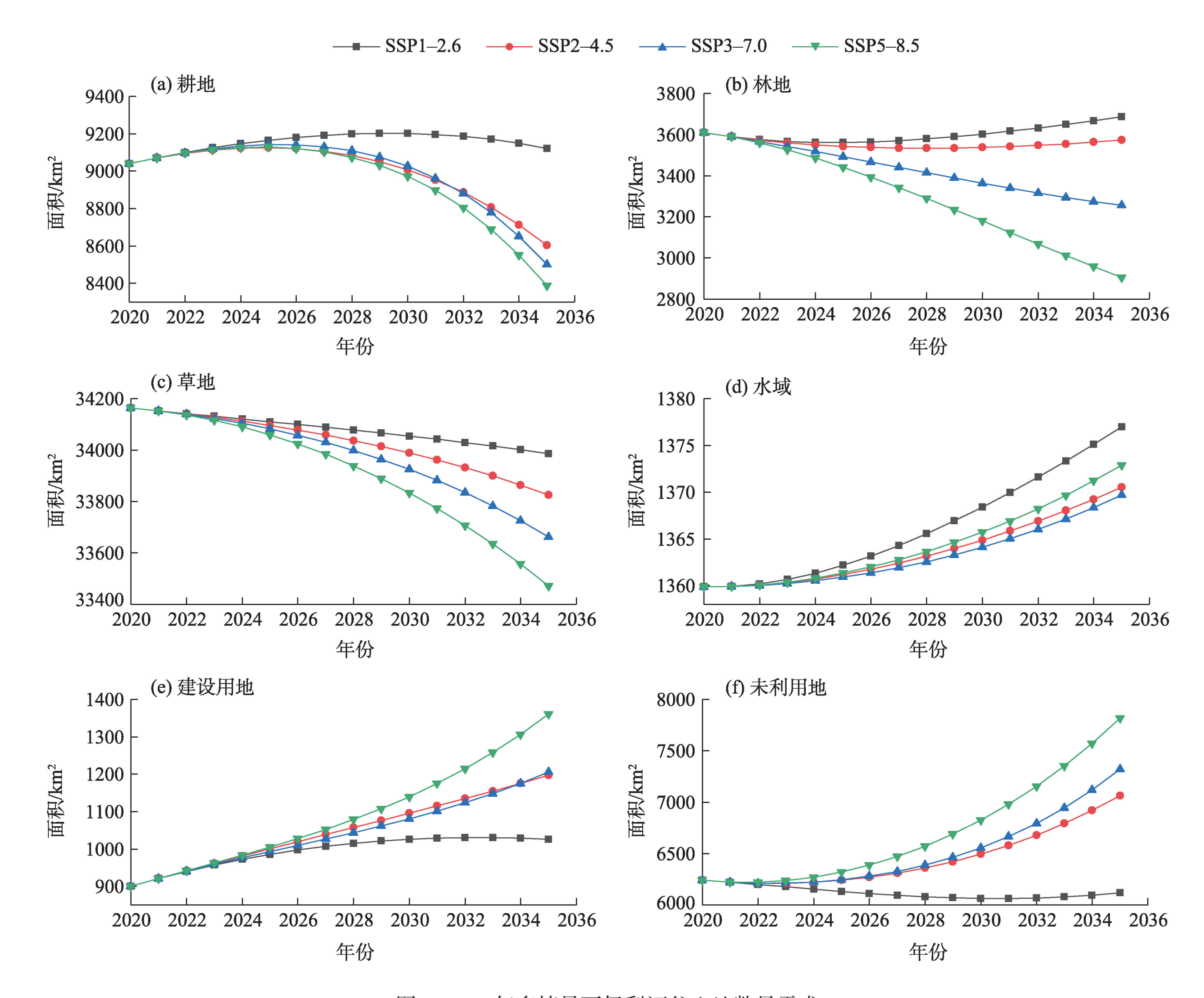


图4　2035年多情景下伊犁河谷土地数量需求

Fig. 4　Land quantity demand in the Ili River Valley under multiple scenarios in 2035

际情况，将其生境评估结果划分为4个等级，分别为生境低值区（0.0~0.3）、较低值区（0.3~0.6）、较高值区（0.6~0.9）、高值区（0.9~1.0）。

整体上来看，伊犁河谷生境质量状况较好，生境等级以较高值区为主，占据研究区总面积的60%左右（表6）。从时间尺度上看，1980、1990、2000、2010、2020年伊犁河谷生境指数均值分别为0.7581、0.7398、0.7331、0.7216、0.7209，呈现持续下降的趋势。从空间尺度上来看，伊犁河谷生境质量成条带状嵌套式分布（图5a~e）。生境等级的高低

表6 伊犁河谷生境指数统计

Tab. 6 Habitat index statistics of the Ili River Valley

年份	情景	生境指数均值	生境等级面积占比/%			
			低值区	较低值区	较高值区	高值区
1980		0.7581	11.65	11.37	67.76	9.22
1990		0.7398	12.40	13.51	64.83	9.27
2000		0.7331	12.56	14.52	64.11	8.81
2010		0.7216	12.63	15.82	62.62	8.93
2020		0.7209	12.88	16.42	61.76	8.94
2035	SSP1-2.6	0.7204	12.92	16.49	61.46	9.14
2035	SSP2-4.5	0.7141	13.98	15.91	61.17	8.94
2035	SSP3-7.0	0.7115	14.31	15.91	60.87	8.91
2035	SSP5-8.5	0.7068	15.24	15.16	61.46	8.14

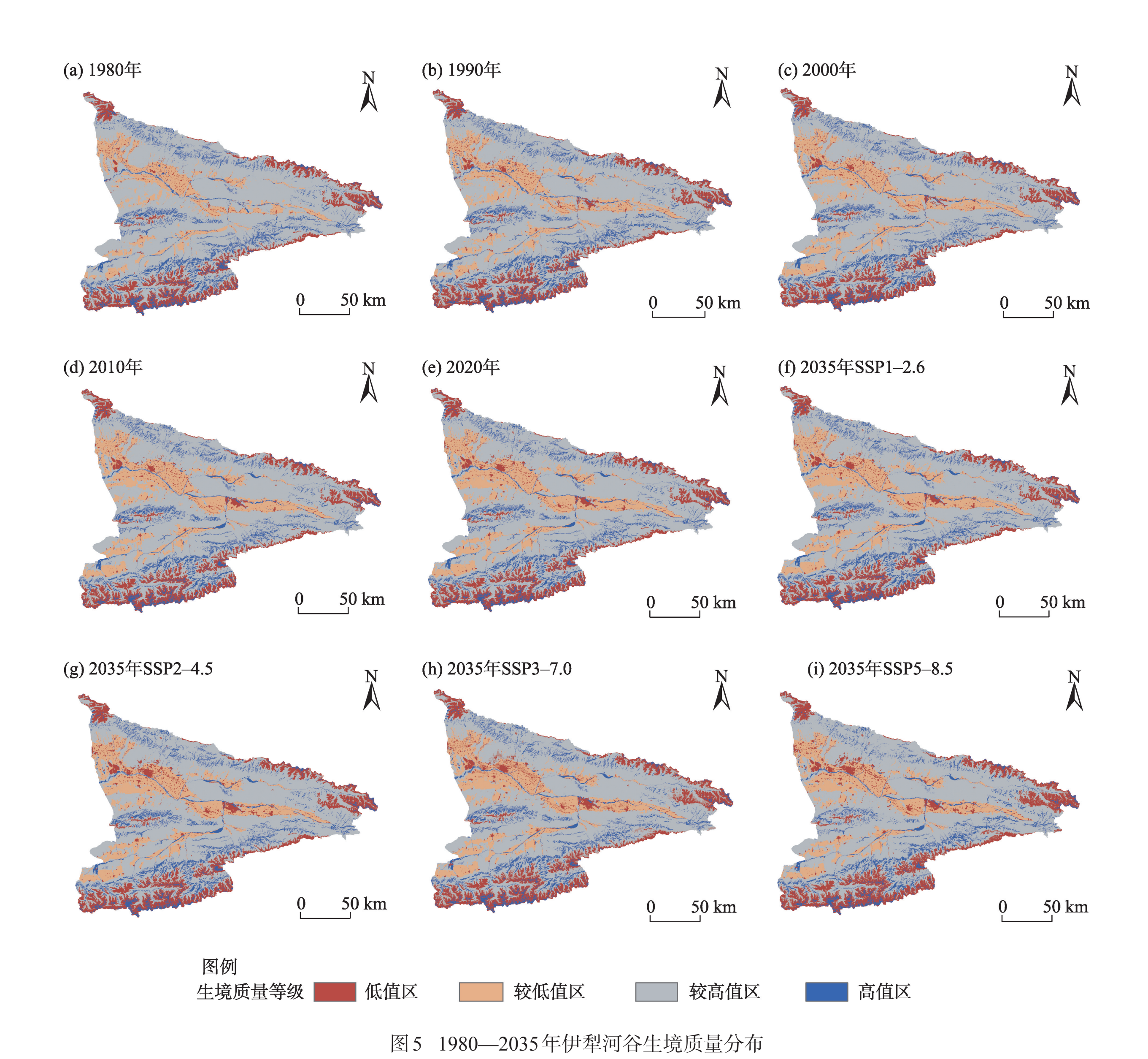


图5 1980—2035年伊犁河谷生境质量分布

Fig. 5 Habitat quality distributions of the Ili River Valley from 1980 to 2035

与研究区土地利用/覆被类型有着密切的联系，生境质量高值区及较高值区主要分布在植被覆盖度高的林草地区域，这些地区往往地形崎岖，受人类活动干扰少，生境质量较好；生境质量低值区及较低值区主要分布在河谷城市群、南北天山冰川积雪覆盖区及冲击平原耕作区，这些地区受人类活动影响较大，资源环境相对脆弱。

耦合SD-PLUS模型与InVEST模型预测伊犁河谷未来生境质量（图5f~i），研究结果显示该区域2035年不同气候情景下，生境指数均值皆呈下降态势，不同发展情景下生境指数均值排序分别为：SSP1-2.6>SSP2-4.5>SSP3-7.0>SSP5-8.5。与2020年相比，SSP1-2.6情景下，生境均值下降最少为0.0005，生境质量高值区面积提升0.2%，生境低值区面积低于其他3种发展情景；SSP2-4.5情景下，生境均值下降0.0068，生境高值区比例与2020年持平，生境低值区比例仅高于SSP1-2.6情景；SSP3-7.0情景下，生境均值下降较为显著达0.0094，较高值区比例下降高达0.89%，较低值区比例仅次于SSP5-8.5情景；SSP5-8.5情景下，生境均值下降最为显著达0.0141，相较其他3种发展情景，该情景下生境高值区比例最低，生境低值区比例最高。

2.4　伊犁河谷生境退化研究

生境退化是指由人类活动及自然因素引起的生境质量下降和支撑生物群落能力减弱的现象，其作为生境质量的度量指标，对于维持区域生物多样性和促进经济社会发展具有重要影响。为准确定位伊犁河谷生境退化区，本文运用ArcGIS 10.8中栅格计算器工具，将两期生境质量栅格图层叠加分析，得到伊犁河谷一定时域内的生境质量退化图。如图6所示，1980—2020年，伊犁河谷大部分区域生境质量较为稳定，科古琴山-博罗克努山南麓及哈尔克他乌山-那拉提山北麓地区受地形条件影响，降雨丰沛，植被生长旺盛，受人类活动影响较小，生境退化不明显。生境退化显著区主要分布在伊犁河-巩乃斯河流及特克斯河流谷地的农业耕作带，其中“伊-霍”城市群生境退化聚集程度较高，可克达拉市工业园区的大量建设导致其生境退化最为严重；巩留县东北部及新源县西北部地区农牧业的发展超出了自然资源的承载力，使得其生境质量下降也较为明显。此外，昭苏县天马养殖业及旅游业的发展，也为当地生态环境的保护造成了一定的压力。

为使本文的研究成果更具参考价值，本研究使用分区统计工具，将生境质量退化均值按行政单元可视化呈现，并按自然断点法将生境退化度划分为5级，分别定义为冷点区、次冷点区、不显著区、次热点区、热点区。SSP1-2.6情景下，以生境退化冷点

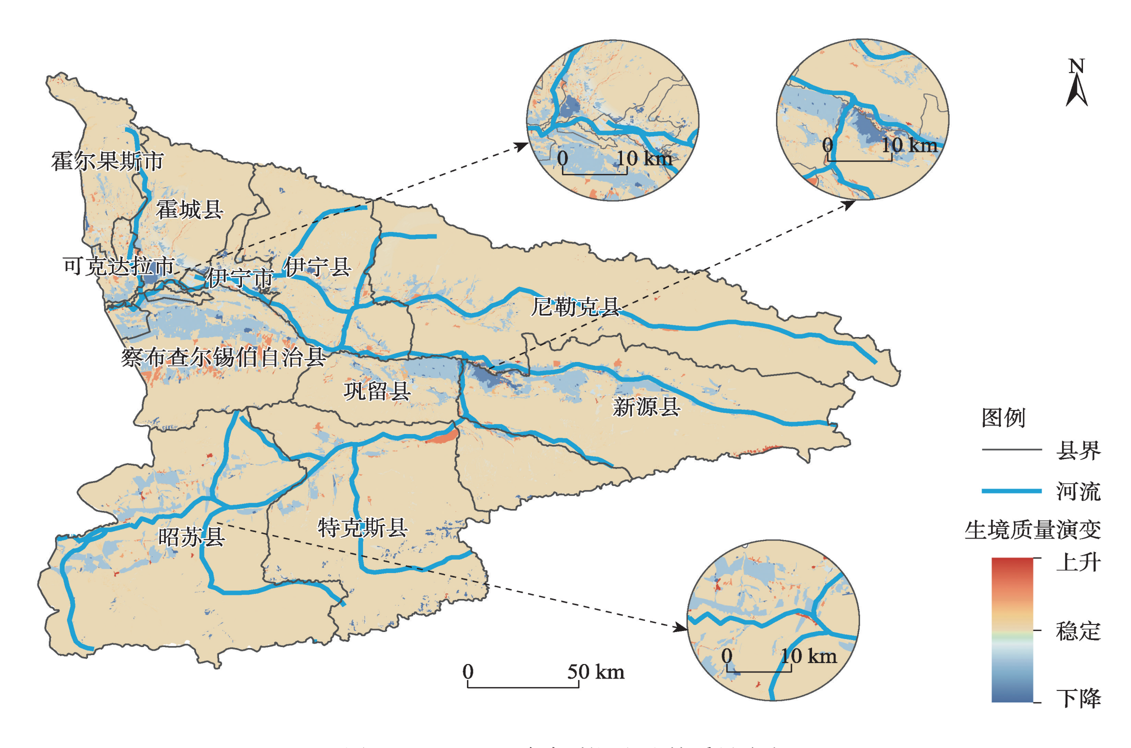


图6　1980—2020年伊犁河谷生境质量演变

Fig. 6　Habitat quality evolution of the Ili River Valley from 1980 to 2020

区为主，生境退化不明显。SSP2-4.5、SSP3-7.0、SSP5-8.5情景下，生境退化热点区、次热点区及次冷点区都有所增加。生态退化热点区县域数量占比排名为：SSP5-8.5>SSP3-7.0>SSP2-4.5，其中伊宁市的巴彦岱镇在以上3种情景下，均为生境质量退化的热点区域；霍尔果斯及都拉塔边境口岸、新源县的种羊场及公安农场、巩留县的牛场及综合农场等农牧业基地均面临生境质量退化风险。从县域上来看，伊宁县、察布查尔锡伯自治县、巩留县、新源县、霍城县生境质量退化较为显著，尼勒克县、昭苏县、特克斯县生境质量较为稳定。从生境重心转移上看(图7)，2035年4种气候情景下，生境低值区重心及较高值区重心转移较为明显，高值区及较低值区重心变幅较小。生境低值区重心及较高值区重心均向东南转移，SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0、SSP5-8.5情景下，生境低值重心分别向东南转移43.83 km、25.24 km、32.24 km、35.57 km；生境较高值区重心分别向东南转移42.21 km、60.73 km、67.65 km、66.28 km。研究结果表明，伊犁河谷在今后的发展过程中需要加强东南部地区草地生态系统的保护力度，预防人类活动及气候变化引起的草地退化及生态斑块破碎化。

3 讨论

3.1 伊犁河谷生境质量的预测研究

构建生境质量评价模型，预测未来不同发展情景下河谷地区生态演变及退化状况，对当地采取措施预防生态环境恶化具有一定的参考价值。本研究综合考虑人类活动及气候因素对生境质量的影响，弥补了当下生境质量预测研究中对气候变化考虑较少的缺陷。此外，在土地利用预测过程中运用SD-PLUS集成模型，将共享社会经济路径下的人口、

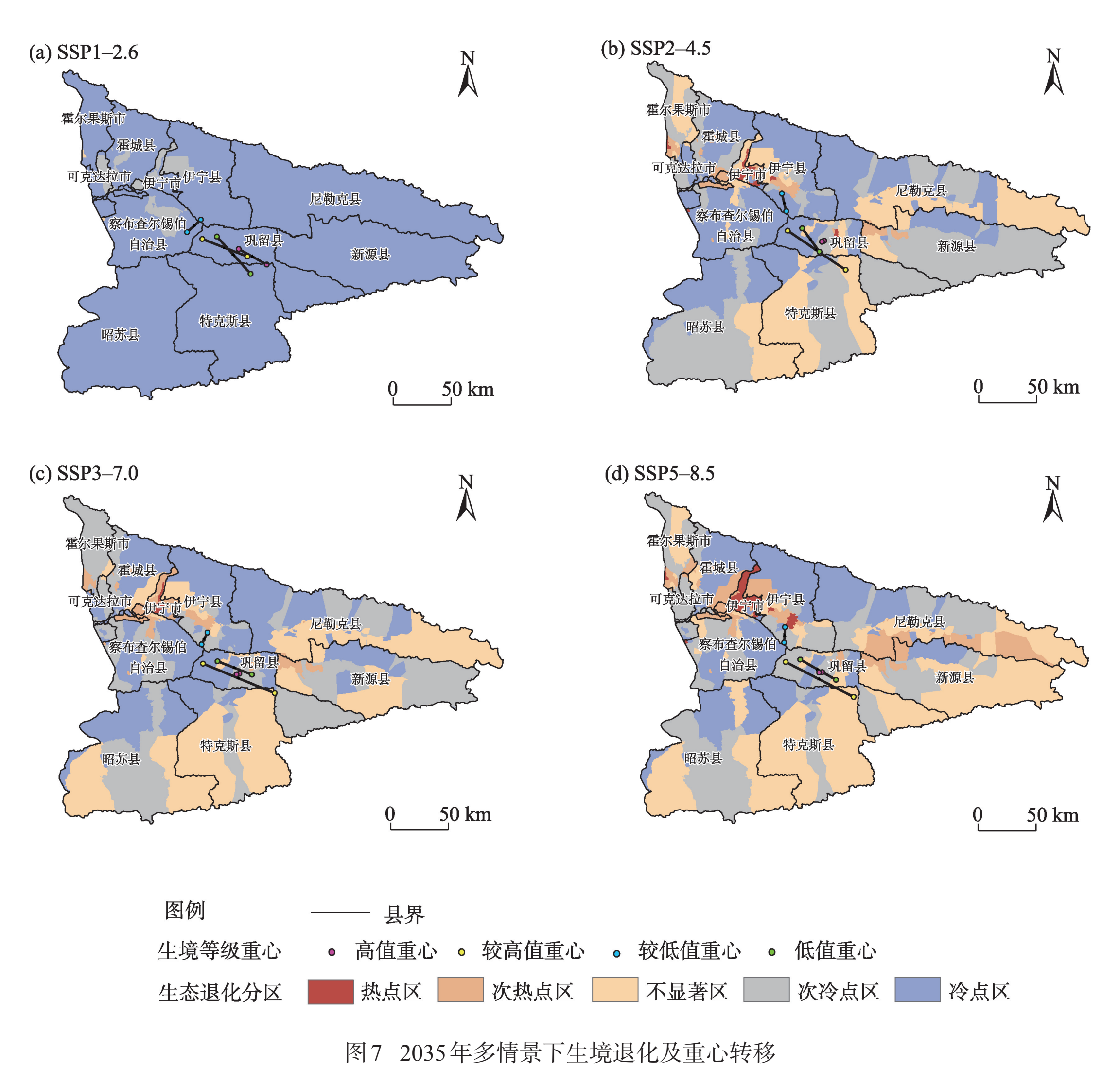


图7 2035年多情景下生境退化及重心转移

Fig. 7 Habitat degradation and center of gravity shift under multiple scenarios in 2035

城镇化率、地区生产总值及CMIP6模式下的气温、降水等多源数据输入SD模型。SD模型依据研究区历史数据构建土地利用反馈机制,实现未来多种气候情景下,伊犁河谷土地利用数量需求的预测,并将预测结果输入到PLUS模型中实现土地利用空间分布格局的模拟。SD-PLUS集成模型的结合减少了土地利用预测中各地类转移量设置的随意性及不确定性,使得模拟效果更加精准。研究结果表明,1980—2020年,伊犁河谷地区生境质量持续下降,2035年4种典型气候情景下,生境指数均值皆保持下降趋势,伊犁河谷地区生态问题不容乐观,这与朱增云等[28]的研究结果较为一致。

3.2　生境质量对土地利用/覆被变化的响应

伊犁河谷生境质量等级与土地利用类型有着密切的联系。从生境质量等级空间分布上来看,伊犁河谷生境质量高值及较高值区主要分布在的地形崎岖的林草地覆被区,低值及较低值区主要分布在人类活动集聚区及南北天山未利用地覆被区。从生境退化度上来看,过去40 a间,退化区主要分布在伊犁河-巩乃斯河流域及特克斯河流域,这些地区受人类工农业生产活动影响,地类发生转变进而导致河流沿岸地区生态服务价值降低、生境质量减退。从土地开发强度上来看,伊犁河谷土地开发强度为:SSP5-8.5>SSP3-7.0>SSP2-4.5>SSP1-2.6,研究结果显示土地的开发强度往往与生境质量呈现负相关,这与杨志鹏等[30]的研究结果具有一致性。从生境质量重心转移上来看,生境低值区与生境较高值区重心转移最为明显,这与研究区南部及东部地区大面积草地退化为未利用地,东南部的生态斑块破碎化相关,与闫俊杰等[31]的研究结果具有一致性。以上结论从不同角度,充分地证明了土地利用变化对生境质量的影响,由此可见合理地进行伊犁河谷地区国土空间规划,是改善该地区生境质量的有效途径。

3.3　伊犁河谷生态系统管理的建议及展望

作为我国西部大开发的战略节点,地处于亚欧大陆腹地中部的伊犁河谷,被四周极其干旱的沙漠与戈壁包围,加强伊犁河谷生态保护修复对筑牢中国西北部生态安全屏障具有重要意义。尽管该地区颁布了《伊犁河谷生态环境保护条例》《伊犁河谷百万亩生态经济林建设和生态修复工程规划》等生态治理规划条例,但预测结果显示,2035年不同气候情景下,伊犁河谷生境质量仍呈现持续下降趋势。伊犁河谷生境质量与土地利用/覆被类型密切相关,合理地进行国土资源优化配置是提升该地区生境质量、防范生境退化的有效抓手。为解决该地区草地面积持续下降、建设用地"摊大饼式"扩张、城郊耕地资源被蚕食3大主要生态问题,伊犁河谷在今后发展过程中需严格遵循《伊犁州直国土空间总体规划(2021—2035年)》,通过构建河谷及沿边城镇发展轴,进一步加强伊宁市、霍尔果斯市、新源县的区域中心功能,推动国土集聚开发,引导人口和产业的相对集中布局。同时,着重夯实农业强州的空间基础,加强耕地资源保护,保障粮食生产安全,严格执行耕地和永久基本农田保护任务,以防止耕地的"非农化"和"非粮化",并推进补充耕地储备库的整改和提质工作。在草原生态保护方面,继续实施补助奖励机制,对草畜平衡、草原禁牧和牧民生产进行奖励和补助,此外加强对草地退化的动态监测,提升草地覆盖度和产出能力。

本研究耦合SD-PLUS与InVEST模型,预测伊犁河谷典型气候情景下土地利用/覆被和生境质量时空格局演变,为伊犁河谷生态环境保护和可持续发展提供依据和参考。然而,本研究也存在着一定的不足。首先,在运用SD模型进行气候情景预测过程中使用到多源数据,其中未来人口、城镇化率、地区生产总值、气温、降水数据为全球或全国尺度,数据的精确性及数据之间的匹配度有待进一步考量。其次,伊犁河谷地形复杂、地势起伏较大,根据贾磊等[32]、刘长雨等[33]的研究结果显示,在山地城市地形梯度效应对生境质量有着绝对性的影响,未来可从地形因子视角探究伊犁河谷生境质量的地形梯度效应,以期为区域生物多样性保护和生态安全格局构建提供科学参考依据。

4　结　论

(1) 本文使用SD-PLUS集成模型模拟未来土地利用类型数量和空间演变,其中SD模型在确定土地利用需求时,误差控制在±3%以内;PLUS模型模拟结果总准确率为0.97,Kappa系数为0.94,FOM值为0.1,说明SD-PLUS模型适用于伊犁河谷未来土地利用/覆被演变及生境质量预测研究。

(2) 1980—2020年,伊犁河谷各地类面积呈现"4增2减"的变化趋势。SD-PLUS模型预测研究结果显示,2035年4种气候情景下,伊犁河谷耕地、林地、草地面积主要呈现下降趋势,水域、建设用地、未利用地面积主要呈现上升趋势。

(3) 伊犁河谷生境质量等级与土地利用/覆被

类型密切相关,生境高值区主要分布在林草地覆被区,生境低值区主要分布在人类活动集聚区及南北天山未利用地覆被区。1980—2020年,伊犁河谷生境指数呈现下降趋势。2035年4种气候情景下,生境指数持续走低,生境指数均值分别为0.7204、0.7141、0.7115、0.7068。

(4) 1980—2020年,伊犁河谷生境退化区主要集中在伊犁河-巩乃斯河流域及特克斯河流域。2035年4种气候情景下,生境退化程度排名为SSP5-8.5>SSP3-7.0>SSP2-4.5>SSP1-2.6。伊宁市的巴彦岱镇、霍尔果斯及都拉塔边境口岸、新源县的种羊场及公安农场、巩留县的牛场及综合农场等地面临生境质量退化风险。伊犁河谷今后的发展过程中需预防人类活动及气候变化引起的草地退化及生态斑块破碎化,防止生境质量低值及较高值区向东南部转移。

参考文献(References)

[1] 陈艳, 吴睿, 马月伟, 等. 典型喀斯特地区生境质量的时空分异与模拟研究[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(12): 1593-1603. [Chen Yan, Wu Rui, Ma Yuewei, et al. Spatial and temporal differentiation and simulation of habitat quality in typical karst areas[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(12): 1593-1603.]

[2] 喻忠磊, 张文新, 梁进社, 等. 国土空间开发建设适宜性评价研究进展[J]. 地理科学进展, 2015, 34(9): 1107-1122. [Yu Zhonglei, Zhang Wenxin, Liang Jinshe, et al. Progress in evaluating suitability of spatial development and construction land[J]. Progress in Geography, 2015, 34(9): 1107-1122.]

[3] 王超, 常勇, 侯西勇, 等. 基于土地利用格局变化的胶东半岛生境质量时空演变特征研究[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(10): 1809-1822. [Wang Chao, Chang Yong, Hou Xiyong, et al. Temporal and spatial evolution characteristics of habitat quality in Jiaodong Peninsula based on changes of land use pattern[J]. Journal of Geo-information Science, 2021, 23(10): 1809-1822.]

[4] 张晓璐, 王晓欣, 华丽娟, 等. 新疆温度和降水变化的CMIP6模式预估[J]. 大气科学, 2023, 47(2): 387-398. [Zhang Xiaolu, Wang Xiaoxin, Hua Lijuan, et al. Projections of temperature and precipitation over Xinjiang based on CMIP6 models[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2023, 47(2): 387-398.]

[5] 陈竹安, 刘子强, 张立亭, 等. 南昌市LUCC多情景模拟和生境质量时空演变与预测[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 170-180. [Chen Zhu'an, Liu Ziqiang, Zhang Liting, et al. Multi-scenario simulation of LUCC and spatio-temporal evolution and prediction of habitat quality in Nanchang[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 170-180.]

[6] 冀泳帆, 贾鲁净, 杨联安, 等. 耦合InVEST-PLUS模型的榆林市生境质量时空演变及预测分析[J]. 水土保持学报, 2023, 37(1): 123-132. [Ji Yongfan, Jia Lujing, Yang Lian'an, et al. Spatio-temporal evolution and prediction analysis of habitat ouality in Yulin City coupled with InVEST-PLUS model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(1): 123-132.]

[7] 冯文彬, 林媚珍, 龚建周, 等. 基于FLUS-InVEST模型的中山市生境质量时空分异特征[J]. 生态科学, 2022, 41(3): 16-23. [Feng Wenbin, Lin Meizhen, Gong Jianzhou, et al. Spatiotemporal differentiation of habitat quality in Zhongshan City based on FLUS-InVEST model[J]. Ecological Science, 2022, 41(3): 16-23.]

[8] 胡丰, 张艳, 郭宇, 等. 基于PLUS和InVEST模型的渭河流域土地利用与生境质量时空变化及预测[J]. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1125-1136. [Hu Feng, Zhang Yan, Guo Yu, et al. Spatial and temporal changes in land use and habitat quality in the Weihe River Basin based on the PLUS and InVEST models and predictions[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(4): 1125-1136.]

[9] 唐娇娇, 余成, 张委伟, 等. 基于CLUE-S和InVEST模型的苏州市生境质量评估及预测[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(1): 377-385. [Tang Jiaojiao, Yu Cheng, Zhang Weiwei, et al. Habitat quality assessment and prediction in Suzhou based on CLUE-S and InVEST models[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(1): 377-385.]

[10] 万辛如, 程超源, 白德凤, 等. 气候变化的生态影响及适应对策[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(3): 518-527. [Wan Xinru, Cheng Chaoyuan, Bai Defeng, et al. Ecological impacts of climate change and adaption strategies[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(3): 518-527.]

[11] 隋露, 蒲春玲, 刘志有, 等. 基于PLUS模型的乌鲁木齐市生态服务价值权衡协同探究[J]. 干旱区地理, 2023, 46(1): 159-168. [Sui Lu, Pu Chunling, Liu Zhiyou, et al. Trade-off synergy of ecosystem service value in Urumqi City based on PLUS model[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(1): 159-168.]

[12] Wang Z Y, Li X, Mao Y T, et al. Dynamic simulation of land use change and assessment of carbon storage based on climate change scenarios at the city level: A case study of Bortala, China [J]. Ecological Indicators, 2022, 134: 108499, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108499.

[13] 胡烨婷, 李天宏. 基于SD-CA模型的快速城市化地区土地利用空间格局变化预测[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2022, 58(2): 372-382. [Hu Yeting, Li Tianhong. Forecasting spatial pattern of land use change in rapidly urbanized regions based on SD-CA model[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2022, 58(2): 372-382.]

[14] Wu J, Luo J, Zhang H, et al. Projections of land use change and habitat quality assessment by coupling climate change and development patterns[J]. Science of the Total Environment, 2022, 847: 157491, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157491.

[15] 崔文兵, 侯国博, 陈万基, 等. 基于多情景模拟的伊犁河谷土地利用景观格局分析[J]. 水利水电技术, 2023, 54(9): 1-12. [Cui Wenbing, Hou Guobo, Chen Wanji, et al. Landscape pattern analysis of land use in Yili River Valley based on multi-scenario simulation[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(9): 1-12.

[16] 陈月娇, 李祥, 王月健, 等. 尺度整合视角下伊犁河谷地区生态

安全格局构建——以昭苏县为例[J]. 生态学报, 2023, 43(19): 1-12. [Chen Yuejiao, Li Xiang, Wang Yuejian, et al. Construction of ecological security pattern in Ili River Valley from the perspective of scale integration: A case study of Zhaosu County[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(19): 1-12.]

[17] 刘天弋, 孙慧兰, 卢宝宝, 等. 1998—2018年新疆伊犁河谷植被覆盖度时空变化及驱动力[J]. 东北林业大学学报, 2023, 51(4): 68-74, 79. [Liu Tianyi, Sun Huilan, Lu Baobao, et al. Spatial-temporal variation and driving force analysis of vegetation coverage in the Ili River Valley of Xinjiang from 1998 to 2018[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2023, 51(4): 68-74, 79.]

[18] 史名杰, 武红旗, 贾宏涛, 等. 基于MCE-CA-Markov和InVEST模型的伊犁谷地碳储量时空演变及预测[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(6): 1010-1019. [Shi Mingjie, Wu Hongqi, Jia Hongtao, et al. Temporal and spatial evolution and prediction of carbon stocks in Yili Valley based on MCE-CA-Markov and InVEST models[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, 38(6): 1010-1019.]

[19] 姜彤, 苏布达, 王艳君, 等. 共享社会经济路径(SSPs)人口和经济格点化数据集[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(3): 381-383. [Jiang Tong, Su Buda, Wang Yanjun, et al. Gridded datasets for population and economy under shared socioeconomic pathways for 2020—2100[J]. Climate Change Research, 2022, 18(3): 381-383.]

[20] Wang K C, Wang C, Cai W J, et al. Projected provincial urbanization rate for China[J]. Scientific Data, 2020, 83(7): 421, doi: 10.1038/s41597-020-0421-y.

[21] 田贺, 梁迅, 黎夏, 等. 基于SD模型的中国2010—2050年土地利用变化情景模拟[J]. 热带地理, 2017, 37(3): 547-561. [Tian He, Liang Xun, Li Xia, et al. Simulating multiple land use scenarios in China during 2010—2050 based on system dynamic model [J]. Tropical Geography, 2017, 37(3): 547-561.]

[22] Zhang P, Liu L, Yang L W, et al. Exploring the response of ecosystem service value to land use changes under multiple scenarios coupling a mixed-cell cellular automata model and system dynamics model in Xi'an, China[J]. Ecological Indicators, 2023, 147: 110009, doi: 10.1016/j.ecolind.2023.110009.

[23] Liang X, Guan Q, Clarke K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China[J]. Computers, Environment and Urban Systems, Pergamon, 2021, 85: 101569, doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2020.101569.

[24] Li C, Wu Y, Gao B, et al. Multi-scenario simulation of ecosystem service value for optimization of land use in the Sichuan-Yunnan ecological barrier, China[J]. Ecological Indicators, 2021, 132: 108328, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.0108328.

[25] 周嘉月, 卢麾, 阳坤, 等. 基于CMIP6的中高温升情景对中国未来径流的预估[J]. 中国科学: 地球科学, 2023, 53(3): 505-524. [Zhou Jiayue, Lu Hui, Yang Kun, et al. Projection of China's future runoff based on the CMIP6 mid-high warming scenarios[J]. Science China Earth Sciences, 2023, 53(3): 505-524.]

[26] 孟雅丽, 段克勤, 尚溦, 等. 基于CMIP6模式数据的1961—2100年青藏高原地表气温时空变化分析[J]. 冰川冻土, 2022, 44(1): 24-33. [Meng Yali, Duan Keqin, Shang Wei, et al. Analysis on spatiotemporal variations of near-surface air temperature over the Tibetan Plateau from 1961 to 2100 based on CMIP6 models' data [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(1): 24-33.]

[27] 雷金睿, 陈毅青, 陈宗铸, 等. 基于InVEST模型的海南岛三大流域生境质量时空演变[J]. 应用生态学, 2022, 33(9): 2511-2520. [Lei Jinrui, Chen Yiqing, Chen Zongzhu, et al. Spatiotemporal evolution of habitat quality in three basins of Hainan Island based on InVEST model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33 (9): 2511-2520.]

[28] 朱增云, 阿里木江·卡斯木. 基于地理探测器的伊犁谷地生境质量时空演变及其影响因素[J]. 生态学杂, 2020, 39(10): 3408-3420. [Zhu Zengyun, Kasimu Alimujiang. Spatial-temporal evolution of habitat quality in Yili Valley based on geographical detector and its influencing factors[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(10): 3408-3420.]

[29] 程静, 王鹏, 陈红翔, 等. 渭河流域生境质量时空演变及其地形梯度效应与影响因素[J].干旱区地理, 2023, 46(3): 481-491. [Cheng Jing, Wang Peng, Chen Hongxiang, et al. Spatiotemporal evolution of habitat quality in the Weihe River Basin and its topographic gradient effects and influencing factors[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(3): 481-491.]

[30] 杨志鹏, 王士君, 田俊峰, 等. 东北三省县域开发强度与生境质量的空间关系研究[J]. 地理与地理信息科学, 2022, 38(3): 83-90. [Yang Zhipeng, Wang Shijun, Tian Junfeng, et al. Spatial relationship between county development intensity and habitat quality in the three provinces of northeast China[J]. Geography and Geoinformation Science, 2022, 38(3): 83-90.]

[31] 闫俊杰, 刘海军, 崔东, 等. 近15年新疆伊犁河谷草地退化时空变化特征[J]. 草业科学, 2018, 35(3): 508-520. [Yan Junjie, Liu Haijun, Cui Dong, et al. Spatiotemporal dynamics of grassland degradation in Yili Valley of Xinjiang over the last 15 years[J]. Pratacultural Science, 2018, 35(3): 508-520.]

[32] 贾磊, 姚顺波, 邓元杰, 等. 2000—2020年陕西秦巴山区生境质量时空演变及其地形梯度效应[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(2): 398-413. [Jia Lei, Yao Shunbo, Deng Yuanjie, et al. Temporal and spatial evolution of habitat quality and its topographic gradient effect in Qinling-Daba Mountain area, Shaanxi Province, 2000—2020[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(2): 398-413.]

[33] 刘长雨, 杨洁, 谢保鹏, 等. 黄河流域甘青段生境质量时空特征及其地形梯度效应[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(2): 372-383. [Liu Changyu, Yang Jie, Xie Baopeng, et al. Temporal and spatial characteristics of habitat quality and its topographic gradient effect in the Gansu-Qinghai section of the Yellow River Basin [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2023, 40 (2): 372-383.]

Prediction of habitat quality in the Ili River Valley under the influence of human activities and climate change

SUI Lu[1], YAN Zhiming[2], LI Kaifang[3], HE Peien[1], MA Yingjie[1], ZHANG Rucui[1]

(1. Faculty of Public Administration (Faculty of Law), Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China;
2. MPA Education Center, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China;
3. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, Jiangsu, China)

Abstract: Habitat quality is critical for ecosystem service function and overall health. Accurate prediction of its evolution is essential for fostering high-quality regional ecosystem development. This study employed the system dynamic patch-generating land use simulation (SD-PLUS) model and the integrated valuation of ecosystem services and trade-offs (InVEST) model to forecast land pattern changes, and evaluate the spatial-temporal evolution of habitat quality in the Ili River Valley under diverse 2035 climate scenarios (SSP1−2.6, SSP2−4.5, SSP3−7.0, SSP5−8.5). The findings are as follows: (1) From 1980 to 2020, Ili River Valley land use exhibited a “four increase and two decrease” trend. In 2035, under the four climate scenarios, forest and grassland areas in the Ili River Valley will decrease, with a noticeable trend of construction land expansion, leading to the displacement of high-quality arable land in the suburbs. (2) Habitat quality in the Ili River Valley correlates closely with land use/cover type. High- and higher-value habitat areas are primarily scattered in rugged forest and grassland cover areas. Low- and lower-value areas are mainly concentrated in areas with concentrated human activities and unused land cover areas in the north and south Tianshan Mountains. (3) From 1980 to 2020, the habitat quality in the Ili River Valley exhibited a declining trend, particularly in areas near the Ili-Kunes River and Tekes River Basins. (4) The habitat index of the Ili River Valley is projected to decrease under the four climate scenarios in 2035, with the mean value following the order: SSP1−2.6>SSP2−4.5>SSP3−7.0>SSP5−8.5. Notably, habitat quality in Yining City, border ports, and agricultural and livestock bases is at risk of degradation. In conclusion, the results of this study provide valuable insights for developing ecological restoration policies in the Ili River Valley region and offer innovative ideas for predicting habitat quality in arid and semi-arid areas.

Key words: habitat quality; climate change scenarios; SD-PLUS model; InVEST model; Ili River Valley